

*BE2010 – Encontro Nacional Betão Estrutural
Lisboa – 10, 11 e 12 de Novembro de 2010*

Caracterização do comportamento cíclico em flexão de elementos de BA com armadura lisa



Catarina Fernandes¹



José Melo²



Humberto Varum³



Hugo Rodrigues⁴



Aníbal Costa⁵



António Arêde⁶

RESUMO

Um número importante de estruturas existentes de betão armado foi construído até aos anos 70, com armadura lisa (fracas propriedades de aderência), e antes da entrada em vigor das actuais normas de dimensionamento sísmico. A degradação da aderência aço-betão sob a acção de cargas cíclicas severas é uma das principais causas de dano e colapso deste tipo de edifícios quando sujeitos a acções sísmicas. Neste artigo é feita a descrição do ensaio cíclico de uma viga de betão armado, de dois tramos de 4,0 m de vão, com armadura lisa, proveniente de uma estrutura com mais de 40 anos. É também descrito o modelo numérico desenvolvido no OpenSees para reproduzir a resposta da viga, tendo em conta o mecanismo do escorregamento aço-betão. Os resultados numéricos são apresentados em confronto com os resultados experimentais mais relevantes. Para melhor compreender a influência do escorregamento no comportamento global da viga, foi feita uma segunda análise numérica sem a consideração do escorregamento e estabelecida a comparação entre os resultados numéricos, com e sem os efeitos deste mecanismo, e os resultados experimentais.

PALAVRAS-CHAVE

Armadura lisa; Aderência aço-betão; Flexão simples; Ensaio cíclico; Modelação numérica.

¹ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. cfernandes@ua.pt

² Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. josemelo@ua.pt

³ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. hvarum@ua.pt

⁴ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. hrodrigues@ua.pt

⁵ Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. agc@ua.pt

⁶ Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Dep. Engenharia Civil, 4200-465 Porto, Portugal. aarede@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

Um número importante de edifícios de betão armado existentes na Europa foi construído antes dos anos 70 do século XX, com armadura lisa e sem pormenorização específica para solicitações sísmicas. Em consequência, este tipo de estruturas apresenta uma elevada vulnerabilidade sísmica. A resposta das estruturas de betão armado sujeitas a cargas cíclicas severas, tais como as induzidas pelos sismos, é fortemente condicionada pelo comportamento da aderência aço-betão. Sob este tipo de solicitação a aderência sofre uma degradação progressiva, dando origem ao mecanismo do escorregamento aço-betão. Esta degradação e os efeitos daí decorrentes são particularmente importantes em elementos com armadura lisa. O mecanismo do escorregamento é assim identificado como uma das causas comuns de dano e colapso de estruturas de betão armado sujeitas a acções sísmicas. Em elementos com armadura lisa, as pobres condições de aderência têm uma influência particularmente significativa sobre as rotações nas extremidades dos elementos, podendo aumentar para cerca de 80% a 90% a sua contribuição para a deformação total dos elementos, reduzindo assim a contribuição dos outros mecanismos de deformação, flexão e corte [1,2,3]. Em comparação com o que se verifica para elementos com armadura nervurada, o trabalho experimental e numérico desenvolvido com vista a estudar o comportamento cíclico de elementos estruturais com armadura lisa é muito limitado. No entanto, a importância crescente que se começa a verificar na avaliação da capacidade sísmica das construções existentes em betão armado, tem-se traduzido no aumento dos estudos conduzidos nesta área. Como exemplo de estudos experimentais recentes podem ser referidos os descritos em [3 a 10]. Os dados disponíveis sobre o mecanismo do escorregamento em elementos com armadura lisa são também ainda muito limitados. Ao contrário do que se verifica para elementos com armadura nervurada, não são conhecidos modelos bem estabelecidos e calibrados para descrever o comportamento da aderência em elementos com armadura lisa solicitados por acções cíclicas. Em [11] é apresentada uma proposta recente para traduzir a relação tensão de aderência *versus* escorregamento, desenvolvida com base nos resultados experimentais descritos em [12]. A consideração do mecanismo de escorregamento na análise das estruturas de betão armado é fundamental para obter uma melhor aproximação ao comportamento real das estruturas [2,13,14,15]. No entanto, a análise estrutural é geralmente feita assumindo a hipótese da aderência perfeita entre o aço e o betão. Estudos recentes, tais como os descritos em [13 a 17] visam a implementação dos efeitos do escorregamento na análise de elementos de betão armado. Em termos de programas de análise estrutural, são poucos os conhecidos que permitem considerar o escorregamento.

Neste artigo é descrito o ensaio cíclico de uma viga de betão armado, com dois tramos, construída com armadura lisa. A viga é proveniente de um dos edifícios do Museu de Santa Joana, em Aveiro, com mais de 40 anos de existência, e foi recolhida em 2007 durante a demolição de alguns elementos estruturais para reabilitação do edifício. É também descrito o modelo numérico desenvolvido para reproduzir a resposta da viga, implementado no OpenSees [18]. O modelo foi calibrado com os resultados experimentais e nele foram incluídos os efeitos do mecanismo do escorregamento com recurso ao modelo de escorregamento disponível no programa. Os resultados numéricos são apresentados em confronto com os principais resultados experimentais. Para melhor compreender os efeitos do escorregamento no comportamento global da viga, foi feita uma segunda análise numérica sem a consideração do escorregamento e estabelecida a comparação entre os resultados numéricos, com e sem os efeitos deste mecanismo, e os resultados experimentais.

2. ENSAIO CÍCLICO DA VIGA

2.1 Descrição da viga e materiais

A viga possui uma secção rectangular constante com dimensões 0,18x0,22 m² e cada tramo tem um vão de 4,0 m, de acordo com o representado na Figura 1, onde também é ilustrada a armadura e sua pormenorização. As condições de apoio adoptadas no ensaio (viga simplesmente apoiada) reproduzem as verificadas *in-situ*. Foram verificadas boas condições de ancoragem dos varões longitudinais. O

confinamento do betão é pobre devido à configuração em U dos estribos e ao seu espaçamento, que se verificou ser superior aos valores máximos actualmente admitidos pelo Eurocódigo 2 [19] e pelo Eurocódigo 8 [20].

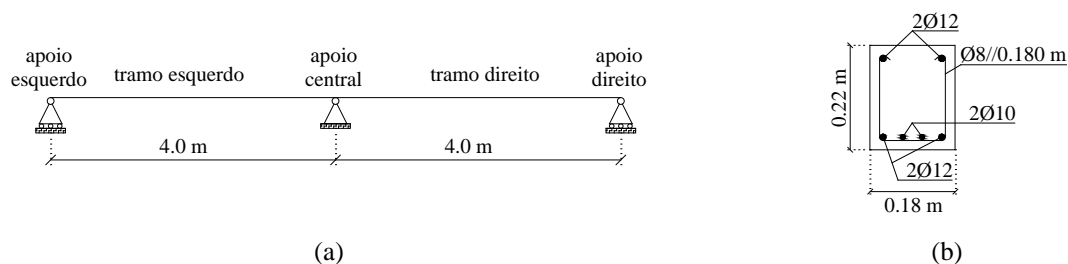


Figura 1. Viga ensaiada: a) geometria, identificação dos vãos e condições de apoio; b) secção transversal.

Uma vez que não foi possível obter amostras de aço em adequadas condições para realizar ensaios de tracção, as suas propriedades mecânicas foram posteriormente estimadas na calibração do modelo numérico. A resistência à compressão do betão foi estimada através da realização de ensaios de compressão de carotes extraídas em zonas não danificadas da viga após o ensaio cíclico. Foi obtido um valor médio para a resistência à compressão de 19 MPa. O correspondente valor característico estimado é de 16,8 MPa, ao qual corresponde a classe de resistência C16/20, de acordo com a classificação do EC2.

2.2 Esquema de ensaio e resultados

2.2.1 Esquema de ensaio e história de cargas aplicadas

O ensaio cíclico foi realizado com controlo em força e consistiu na aplicação de duas forças (F) concentradas, verticais descendentes, de igual intensidade e posicionadas a meio-vão de cada tramo (esquerdo e direito - carregamento simétrico), como ilustrado na Figura 2. As forças foram aplicadas sempre no sentido descendente, descrevendo séries de três ciclos carga-descarga de amplitude crescente, até um valor máximo de força igual a 25 kN (ver Figura 3), para o qual foi verificado o colapso da viga. Os deslocamentos verticais da viga foram registados com recurso a transdutores de deslocamento dispostos em vários pontos ao longo dos dois tramos, permitindo registar a evolução da deformada.

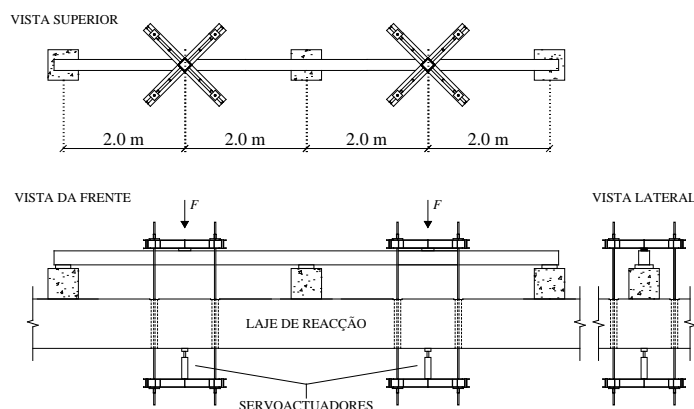


Figura 2. Esquema de ensaio adoptado.

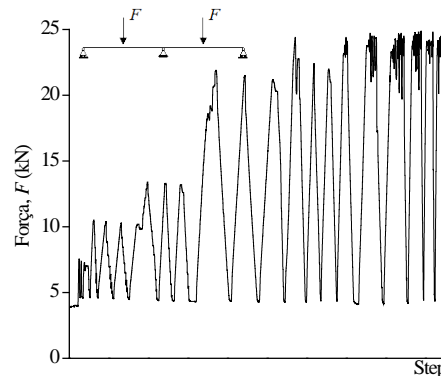


Figura 3. História de cargas aplicadas.

2.2.2 Resultados do ensaio

Apesar da simetria ao nível da geometria da viga e das condições de carga impostas no ensaio, a resposta experimental da viga não foi simétrica. Isto pode ser observado na Figura 4, onde é ilustrada a evolução da deformada da viga e indicados os valores máximos registados para a flecha dos tramos esquerdo e direito, igual a 0,12 m e 0,03 m, respectivamente. Até ao início da fissuração a deformada

da viga é praticamente simétrica. Iniciada a fissuração, o tramo esquerdo passa a exibir maiores deslocamentos do que o tramo direito. Nos diagramas força-deslocamento apresentados mais à frente na Figura 9, observa-se que a relação força-deslocamento inicial nos dois tramos é semelhante e que a força máxima no tramo direito é ligeiramente superior à do tramo esquerdo. As diferenças registadas entre a resposta dos tramos esquerdo e direito poderão estar relacionadas com pequenas diferenças ao nível da geometria, condições de apoio e propriedades dos materiais.

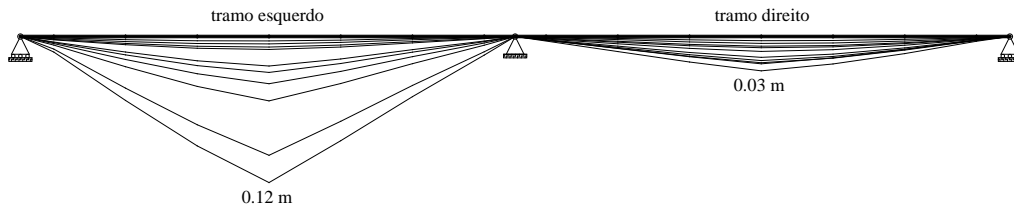


Figura 4. Evolução da deformada da viga.

No decorrer do ensaio formaram-se três rótulas plásticas, cuja localização, sequência de formação (RP1, depois RP2 e finalmente RP3) e comprimento (estimado por observação visual dos danos observados) são indicados na Figura 5. O dano concentrou-se sobretudo nestas regiões. De facto, para além das regiões de rótula plástica praticamente não se verificou o desenvolvimento de outras fissuras. Em vez disso, a abertura das fissuras formadas nessas regiões foi aumentando de forma significativa ao longo do ensaio. A ocorrência de escorregamento entre os varões longitudinais e o betão envolvente justifica a distribuição dos danos observada. O comprimento observado para as rótulas plásticas resulta assim inferior ao que seria verificado caso a viga fosse construída com armadura nervurada, onde seria de esperar a propagação das fissuras ao longo de uma maior extensão da viga.

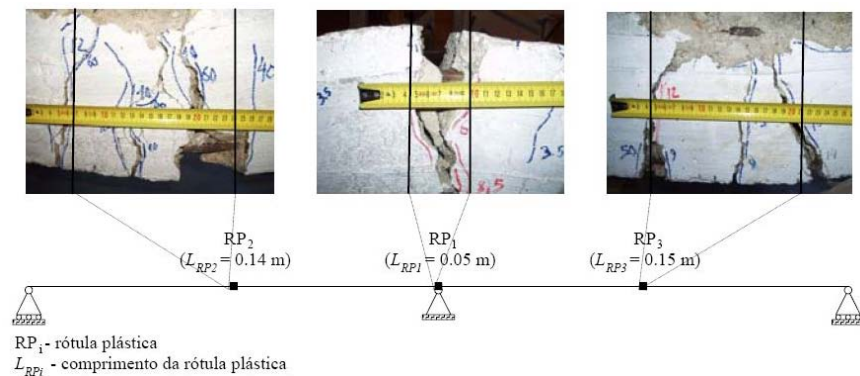


Figura 5 – Localização, sequência da formação e comprimento das rótulas plásticas.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Estratégia de modelação

O modelo foi construído no OpenSees recorrendo aos elementos *BeamWithHinges* e *Zero-length section*, de acordo com o ilustrado na Figura 6. As secções dos elementos *BeamWithHinges* e *Zero-length section* são discretizadas em fibras representando o betão (confinado e não confinado) e a armadura longitudinal, às quais são atribuídas as respectivas propriedades e leis de comportamento dos materiais. Os comprimentos dos elementos indicados na Figura 6 dizem respeito às distâncias efectivas entre pontos de apoio. As grandezas d_e e d_d dizem respeito aos deslocamentos impostos no modelo numérico (ver Secção 3.4).

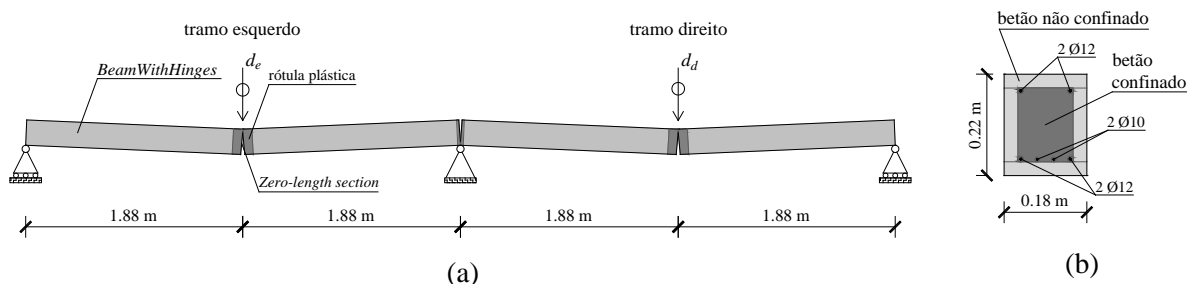


Figura 6. Modelo numérico da viga: a) comprimento dos elementos *BeamWithHinges* e localização dos elementos *Zero-length section*; b) secção transversal.

No elemento *BeamWithHinges* a plasticidade é considerada concentrada nas duas extremidades de cada elemento. Assim, o elemento é dividido em três sub-elementos: i) duas rótulas plásticas, uma em cada extremidade, às quais se atribui o comportamento não-linear dos materiais e cujo comprimento é pré-definido; e, ii) um elemento central de maior comprimento com comportamento linear elástico. No modelo da viga, os valores adoptados para o comprimento das rótulas plásticas correspondem aos medidos experimentalmente (Figura 5). A implementação do escorregamento no modelo numérico é feita associando o modelo de escorregamento, descrito na Secção 3.3, às fibras representativas do aço no elemento *Zero-length section*. O elemento *Zero-length section* tem comprimento unitário. Assim, as deformações do elemento são iguais às deformações da secção que ele representa. No modelo da viga, os três elementos *Zero-length section* foram colocados entre os quatro elementos *BeamWithHinges*, ou seja, entre as rótulas plásticas, concentrando os efeitos do escorregamento naqueles elementos.

3.2 Modelos de comportamento dos materiais

Os modelos *Concrete01* e *Concrete02*, disponíveis no OpenSees, foram utilizados no modelo da viga para descrever o comportamento das fibras de betão. O primeiro foi utilizado nos elementos *Zero-length section* e o segundo nos elementos *BeamWithHinges*. Ambos baseiam-se na lei proposta por [21] e modificada por [22], e têm em conta o efeito do confinamento devido à armadura transversal. A resistência à tracção do betão é contemplada apenas no modelo *Concrete02*. Os valores adoptados para os parâmetros que definem o comportamento do betão são apresentados no Quadro 1. Para a viga em estudo, o comportamento do betão confinado e não confinado é semelhante, em termos de comportamento uniaxial tensão-extensão, devido às fracas condições de confinamento verificadas.

Quadro 1. Valores adoptados para as propriedades mecânicas do betão no modelo numérico.

Betão	E [GPa]	f_{cm} [MPa]	ε_0 [‰]	f_{cum} [MPa]	ε_u [‰]	f_{ctm} [MPa]	ε_{0t} [‰]
Confinado	18,5	19,0	2,0	9,5	7,0	1,2	0,12
Não confinado	17,9	19,2	2,1	11,5	33,0	1,2	0,12

O modelo *Steel02* foi utilizado para descrever o comportamento do aço nos elementos *BeamWithHinges*. O modelo é baseado na formulação de Giuffré-Pinto e implementada por Menegotto-Pinto [23]. Como referido na Secção 2.1, as propriedades mecânicas do aço não puderam ser estimadas. Assim, foram adoptados os valores apresentados no Quadro 2, correspondentes aos valores médios das propriedades mecânicas do aço da classe S235, de comum utilização no passado. Esta hipótese revelou-se satisfatória, podendo ser comprovada pela boa aproximação dos resultados numéricos aos resultados experimentais apresentada na Secção 3.5.

Quadro 2. Valores médios das propriedades do aço adoptadas no modelo numérico.

f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]
260	360	200

3.3 Modelo do escorregamento

O modelo de escorregamento *Bond_SP01* do OpenSees é definido pela relação tensão no aço *versus* escorregamento, e respectivas regras de histerese, que se representam esquematicamente na Figura 7. Mais detalhes sobre o modelo, respectivas regras de histerese e significado das grandezas envolvidas, podem ser encontrados em [24]. O modelo foi desenvolvido com base nos resultados de ensaios cíclicos realizados em elementos com armadura nervurada referidos em [24]. A fim de adaptar o modelo às condições da viga em estudo, construída com armadura lisa, foram feitas algumas alterações nos parâmetros do modelo. Em particular: i) o parâmetro α , que define a forma não linear da envolvente monotónica da curva tensão no aço *versus* escorregamento, foi alterado de 0,4 (valor definido para elementos com armadura nervurada) para 0,5 tendo em conta as recomendações dadas por [25]; ii) foi adoptado o valor máximo admissível para o valor último do escorregamento (s_u), igual a $40s_y$ de acordo com [24]; e, iii) foi adoptado o valor mínimo admissível para o factor de redução da rigidez (b), igual a 0,3 de acordo com [24]. A implementação do modelo de escorregamento no modelo numérico da viga em estudo é explicada com maior detalhe em [26].

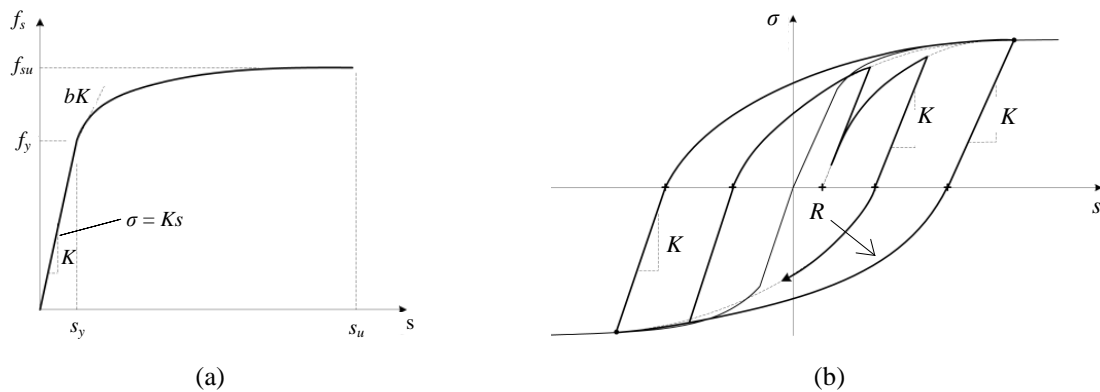


Figura 7. Modelo de escorregamento *Bond_SP01*: a) relação tensão no aço *versus* escorregamento sob carregamento monotónico; b) resposta cíclica.

3.4 Lei de deslocamentos imposta

Como referido anteriormente, o ensaio da viga foi feito com controlo em força. No entanto, apesar da simetria ao nível da geometria da viga e do carregamento, a resposta observada da viga não foi simétrica, devido a pequenas diferenças na viga e ao tipo de carregamento. No modelo numérico, manter estas condições de carregamento em força simétrico resultaria numa resposta simétrica da viga, não sendo nesse caso reproduzíveis os resultados experimentais. Assim, no modelo numérico optou-se por impor as leis de deslocamento medidas a meio-vão dos tramos esquerdo e direito (d_e e d_d , respectivamente), representadas na Figura 8, em vez da lei de forças imposta no ensaio cíclico.

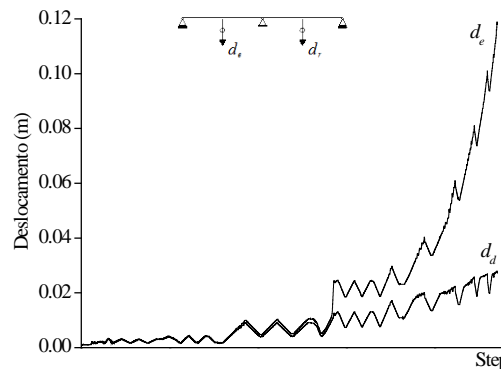


Figura 8. Leis de deslocamento impostas no modelo numérico.

3.5 Resultados numéricos

3.5.1 Resposta em termos de força-deslocamento

Na Figura 9 são representados os diagramas força-deslocamento calculados para as secções de meio-vão dos tramos esquerdo e direito da viga. A comparação estabelecida com os resultados do ensaio demonstram a boa aproximação dos resultados numéricos aos resultados experimentais, quer em termos de força máxima, quer em termos da evolução dos deslocamentos. Na Figura 9 é ainda assinalada a evolução dos principais estados de dano, através da análise dos resultados numéricos, para uma melhor compreensão da sua influência na resposta global da viga.

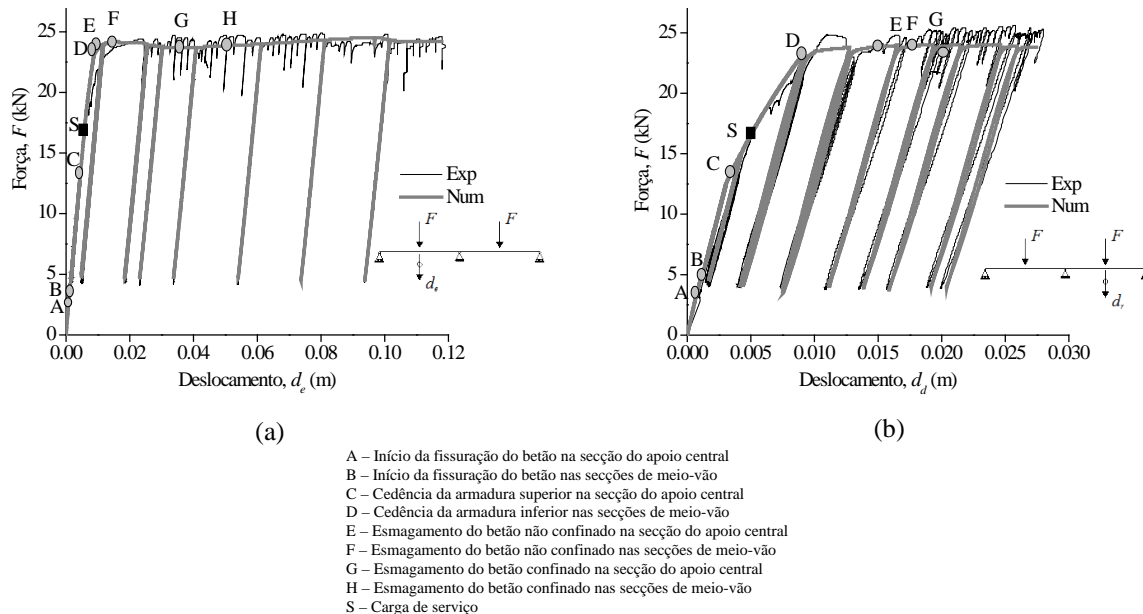


Figura 9. Diagramas força-deslocamento e evolução dos danos: a) meio-vão do tramo esquerdo; b) meio-vão do tramo direito.

Para melhor compreender os efeitos do escorregamento na resposta global da viga, foi feita uma segunda análise, agora não considerando este mecanismo. Na Figura 10 é estabelecida a comparação entre os resultados numéricos, com e sem escorregamento, e os resultados experimentais. Verifica-se que a resposta da viga é reproduzida com maior rigor quando os efeitos do escorregamento são contemplados no modelo numérico. Apesar de não se verificarem alterações em termos da força máxima, a não consideração do escorregamento traduz-se num aumento da rigidez (inicial e dos ciclos internos) da resposta.

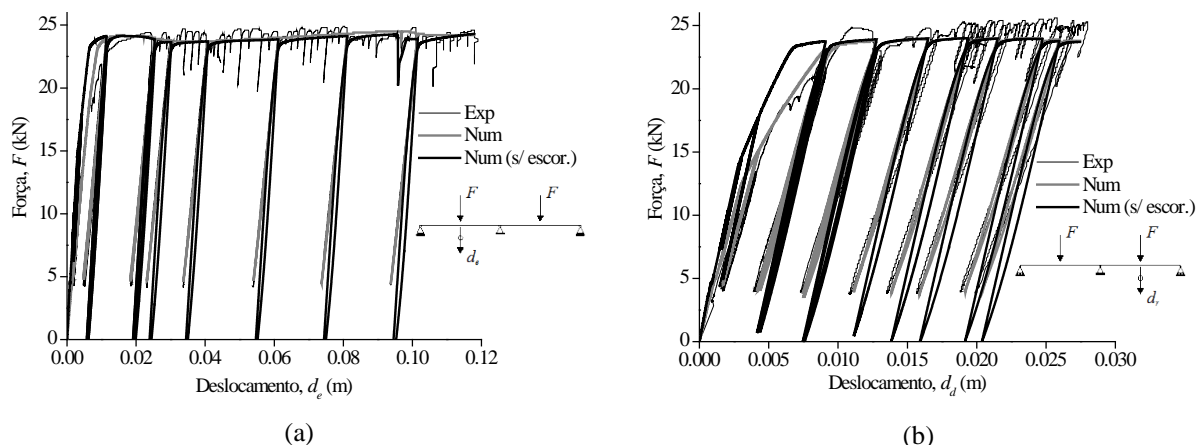


Figura 10. Diagramas força-deslocamento, com e sem a consideração do escorregamento no modelo numérico, e confronto com resultados experimentais: a) meio-vão do tramo esquerdo; b) meio-vão do tramo direito.

3.5.2 Evolução da energia dissipada

A evolução da energia dissipada, obtida com o modelo numérico (com e sem a consideração do mecanismo do escorregamento) e experimentalmente, é ilustrada na Figura 11 e foi calculada através da soma cumulativa da energia dissipada associada a cada ciclo carga-descarga. A consideração do escorregamento no modelo numérico permite obter uma melhor aproximação aos resultados experimentais. A não consideração do escorregamento resulta numa maior dissipação de energia, para o carregamento imposto, com uma diferença máxima igual a 10% em relação à verificada considerando este mecanismo.

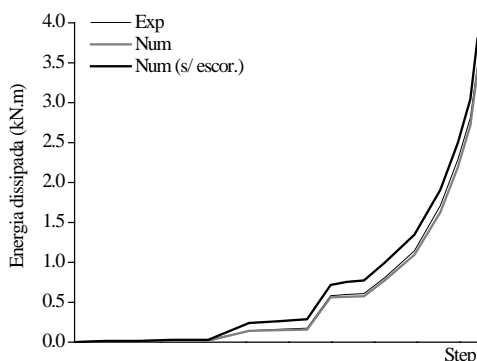


Figura 11. Evolução da energia dissipada.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Neste artigo foi feita a descrição do ensaio cíclico de uma viga de betão armado, construída com armadura lisa, proveniente de uma estrutura existente com mais de 40 anos. Os danos observados no ensaio, nomeadamente a sua concentração nas regiões de rótula plástica, de comprimento reduzido, evidenciam a ocorrência do escorregamento aço-betão e demonstram os seus efeitos ao nível da distribuição dos danos na viga. Para reproduzir a resposta da viga foi construído um modelo numérico no OpenSees, calibrado com os resultados experimentais, e nele foi tido em conta o mecanismo do escorregamento. A comparação estabelecida entre os principais resultados experimentais e os resultados numéricos correspondentes, mostra a capacidade do modelo com em descrever a resposta global da viga sob as condições de carga impostas no ensaio. A não consideração do escorregamento no modelo numérico não permite uma adequada reprodução dos resultados experimentais. É assim verificada a importância fundamental da consideração do mecanismo do escorregamento nos modelos de análise numérica com vista a obter uma representação mais realista do comportamento deste tipo de estruturas.

AGRADECIMENTOS

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Portugal), nomeadamente através das Bolsas de Doutoramento do primeiro, segundo e quarto autores e Bolsa de Licença Sabática do terceiro autor, com as referências SFRH/BD/27406/2006, SFRH/BD/62110/2009, SFRH/BD/63032/2009 e SFRH/BSAB/939/2009, respectivamente. Os autores agradecem a colaboração na preparação e execução do ensaio da viga: i) Eng. Alexandre Costa, Sr. Valdemar Luís e Sr. André Martins, do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LESE-FEUP); ii) Eng. Romeu Vicente, Eng. Henrique Pereira e Eng. Elsa Neto, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Os autores agradecem ainda às empresas CIVILRIA Construções S.A., Silva Tavares & Bastos Almeida Lda. e Arlindo Correia & Filhos S.A., pela colaboração no transporte da viga e na construção do sistema de reacção para o ensaio. Um agradecimento ainda para o Museu de Santa Joana, em Aveiro, pelo acesso facilitado ao edifício de onde foi retirada a viga.

REFERÊNCIAS

- [1] VERDERAME, G.M. [et al.]. - Ultimate chord rotation of RC columns with smooth bars: some considerations about EC8 prescriptions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, ISSN 1570-761X (Print) p. 1573-1456 (Online), DOI 10.1007/s10518-010-9190-x, publicação online a 3 de Junho 2010.
- [2] VERDERAME, G.M.; FABBROCINO, G.; MANFREDI, G. - Seismic response of R.C. columns with smooth reinforcement. Part I: Monotonic tests. *Engineering Structures*, v. 30, 2008. p. 2277-2288.
- [3] VERDERAME, G.M., FABBROCINO, G., MANFREDI, G. - SEISMIC Response of R.C. columns with smooth reinforcement. Part II: Cyclic tests. *Engineering Structures*, v. 30, 2008. p. 2289-2300.
- [4] MAREFAT, M.S. [et al.] - Cyclic Response of Concrete Beams Reinforced by Plain Bars. *Journal of Earthquake Engineering*, v. 13, 2009. p. 463-481.
- [5] FABBROCINO, G., VERDERAME, G.M., MANFREDI, G. - Rotational capacity of old type R.C. columns. *Proceedings of fib Symposium "Keep Concrete Attractive"*, Budapeste, 2005.
- [6] PAMPANIM, S.; CALVI, G.M.; MORATTI, M. - Seismic behaviour of RC beam-column joints designed for gravity loads. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Londres, 2002. Artigo 726.
- [7] LIU, A.; PARK, R. - Seismic behaviour and retrofit of pre-1970's asbuilt exterior beam-column joints reinforced by plain round bars. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, v. 34, n. 1, 2001. p. 68-81.
- [8] CALVI, G.M.; MAGENES, G.; PAMPANIN, S. - Relevance of beam-column joint damage and collapse in RC frame assessment. *Journal of Earthquake Engineering*, v. 6, 2002. p. 75-100.
- [9] PINTO, A.V.; VARUM, H.; MOLINA, J. - Experimental Assessment and Retrofit of Full-Scale Models of Existing RC Frames. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Londres, 2002. Artigo 855.
- [10] VARUM, Humberto - *Seismic Assessment, Strengthening and Repair of Existing Buildings*. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2003. 508 p. Tese de Doutoramento.
- [11] VERDERAME, G.M. [et al.]. - Cyclic bond behaviour of plain bars. Part II: Analytical investigation. *Construction and Building Materials*, v. 23, 2009. p. 3512-3522.
- [12] VERDERAME, G.M. [et al.]. - Cyclic bond behaviour of plain bars. Part I: Experimental investigation. *Construction and Building Materials*, v. 23, 2009. p. 3499-3511.
- [13] MONTI, G.; SPACONE, E. - Reinforced Concrete Fiber Beam Element with Bond-Slip. *Journal of Structural Engineering*, v. 126, n. 6, 2000. p. 654-661.
- [14] SPACONE, E.; LIMKATANYU, S. - Responses of Reinforced Concrete Members Including Bond-Slip Effects. *ACI Structural Journal* 2000; v. 97, n. 6, 2000. Title No. 97-S84, p. 831-839.
- [15] LIMKATANYU, S.; SPACONE, E. - Reinforced Concrete Frame Element with Bond Interfaces. I: Displacement-Based, Force-Based and Mixed Formulations. *Journal of Structural Engineering*, v.128, n. 3, 2002. p. 346-355.

- [16] MANFREDI, G.; PECCE, M. - A refined R.C. beam element including bond-slip relationship for the analysis of continuous beams. *Computers and Structures*, v. 69, 1998. p. 53-62.
- [17] JENDELE, L., CERVENKA, J. - Finite element modelling of reinforcement with bond. *Computer and Structures*, v. 84, 2006. p. 1780-1791.
- [18] Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees): disponível *online* em <http://opensees.berkeley.edu/>.
- [19] NP EN 1992-1-1. 2010, Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Lisboa: IPQ. 245 p.
- [20] NP EN 1998-1. 2010, Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Lisboa: IPQ. 230 p.
- [21] HOGNESTAD, Eivind - A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete. Illinois: University of Illinois, 1951. 128 p. Bulletin Series 339.
- [22] GUEDES, João Miranda - Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Bridges. Modelling, Numerical Analysis and Experimental Assessment. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997. 426 p. Tese de Doutoramento.
- [23] MENEGOTTO, M.; PINTO, P. - Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending. *Proceedings of IABSE Symposium: Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, Lisboa, 1973.
- [24] ZHAO, J.; SRITHARAN, S. - Modelling of strain penetration effects in fibre-based analysis of reinforced concrete structures. *ACI Structural Journal*, v. 104, n. 2, 2007. p. 133-141.
- [25] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN (CEB). - Bulletin d'Information N. 217 - Selected justification notes, 1993. 240 p.
- [26] MELO, José - Influência do Escorregamento na Resposta Cíclica de Elementos de BA. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2009. 81 p. Tese de Mestrado.